

コロナ放電における絶縁材料の劣化およびその極性効果に関する研究

著者	堺 孝夫
号	19
発行年	1965
URL	http://hdl.handle.net/10097/10967

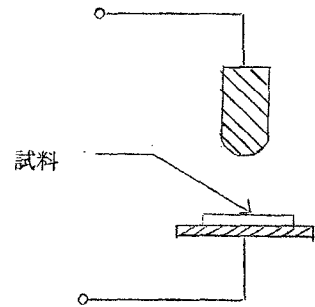
氏名（本籍）	堺 孝 夫（宮城県）
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	工 第 19 号
学位授与年月日	昭和 4 1 年 1 月 1 2 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当
最 終 学 歴	昭和 3 3 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電気及通信工 学専攻修士課程修了
学位論文題目	コロナ放電における絶縁材料の劣化およびその極性効果に関する研究
論文審査委員	（主 査） 教授 麻 生 忠 雄 教授 八 田 吉 典 教授 大 原 儀 作 教授 長 尾 重 夫

論 文 内 容 要 旨

電気機器の小型化・高電圧化とともに、絶縁材料の劣化あるいは劣化破壊機構に関する研究が重要視されるようになった。絶縁材料の電気的強度は真の破壊強度であらわされるが、実用上では、その $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{100}$ の強度に相当する電界で使用されているにすぎない。その原因は、機器が長年月に亘つて使用されているあいだに絶縁材料が劣化され、比較的低い電圧で絶縁破壊が生ずる危険があることにある。特に、特定の場所に電界の集中がある場合には、コロナ放電によつて絶縁材料の局部劣化が生じ、絶縁機能を失う。従つて、実用上コロナ劣化が機器の寿命を決定することが多く、コロナ劣化機構の解明をおこない、劣化防止対策を樹立することは電気工学において極めて重要であり、本研究を行なつた所以もその点にある。

コロナ放電劣化の原因は複雑で、劣化特性測定結果の再現性が乏しい。

従つて測定方法にも問題がある。本研究では試料の耐コロナ性測定に電気学会放電専門委員会から提案された集中法を用い、同時に集中法におけるコロナ放電特性に関する解析を行なつた。集中法は右図のごとき電極配置を用い、棒電極と試料表面との間のギャップでパルス性コロナ放電を生ぜしめ、印加電圧と試料の破壊するまでの時間ないし、パルス性放電々荷量の大小により耐コロナ性を判断する方法である。



ポリエチレン・ γ 線（線源 Co^{60} ） β 線（線源 1MV バンデグラフ）照射ポリエチレン・マイラ・テフロン耐コロナ性を集中法によつて測定した結果、次の事項が明らかになつた。

☆ 集中法によつてコロナ劣化破壊試験を行う際、印加電圧と破壊に至るまでのパルス性放電々荷量の総和によつて結果を整理すると、再現性がよい。

☆ 個々のコロナ電流パルスの大きさ、および破壊までのパルス性電流量の総和は印加電圧に依存する。しかし、電圧が小さく、コロナ電流パルスも小さい領域では、コロナ電流パルスの破壊までの総和の、電圧に対する依存性は小さい。

☆ 空気中におけるコロナ劣化の周囲温度による効果を測定した結果、 $30^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ でポリエチレンの耐コロナ性が最大となる。この結果は空気中劣化試験に特有で、窒素および六弗化硫黄中では見られず、酸化現象にもとづくものと推定される。

気体絶縁材料として使用されるよになつた SF_6 中のコロナ劣化に対して集中法が利用出来るか否か、寿命がどのように変化するか、放電に対する抵抗性などのように変化するか、をたしかめるために、1気圧の SF_6 中におけるマイラ・ポリエチレンの耐コロナ性を集中法により測定した。

☆ その結果、 SF_6 中では空気中にくらべてサイクル当りのコロナ数が少なく、個々の放電々荷量も約 $1/4$ に減少すること、従つて寿命は長くなる。しかし、破壊に至るまでの放電々荷量の和は空気中劣化の場合の $1/4 \sim 1/5$ で、単位放電々荷量当りの劣化は、空气中よりも SF_6 中において大であることが明らかになつた。

ポリエチレンの機械的強度および耐熱性が改善されることに着目し、照射ポリエチレンの耐コロナ性を測定した。

☆ その結果放射線照射によつてポリエチレンの耐コロナ性の改善がもたらされるとは云えないことが明らかになつた。

加速劣化を行うこと、コロナ放電の大きさをそろえること、印加電圧波数とコロナ数を一致させること、極性による劣化の差を推定する目的で、集中法の電極配置にて、くりかえしパルス電圧を用い、マイラの耐コロナ性を測定した。ギャップを変化させる際には、印加パルス1箇で同極性のコロナ放電が1回生ずる様、印加パルス電圧をかえ、印加電圧・寿命特性を求めた。

☆ その結果、集中法、接触法に交流を用いた場合同様 $\log T \propto V$ の関係が得られ、その再現性もすぐれている。寿命 T は、印加電圧の 2.5 乗ないし 2.7 乗に逆比例し、大きなパルスに対してより寿命が短いこと、正コロナパルスによる劣化が負コロナによる劣化より大であることが判明した。

集中法を用いてコロナ放電を生ぜしめる際の放電現象について解析した。

☆ その結果印加電圧を上昇させた場合個々のコロナ電流パルスが大となる事を、放電おくれを用いて説明することができた。

次に、大気中における劣化測定の際、試料表面に蓄積された電荷が、漏洩抵抗を通じて流れる場合のコロナパルス数と漏洩抵抗との関係を求めた。

もれ時定数を τ_s とし、ギャップに印加される直流電圧を V とすると火花のくりかえし周期 t は

$$t = \tau_s \frac{\ln \left(\frac{1 - V_{gs}/V}{1 - V_{gr}/V} \right)}{1 - V_{gs}/V} \quad \begin{array}{l} V_{gs} : \text{放電開始電圧} \\ V_{gr} : \text{放電停止電圧} \end{array}$$

で与えられる。模擬回路を用いて実験の結果、 V_{gr} を無視して差し支えないことを確認し、つづいて、集中法の配置にて鋸歯状波電圧および交流電圧を印加して τ_s を求めた結果

☆ 本測定条件では τ_s が 10^{-2} ~ 10^{-4} sec であること、 τ_s は相対湿度とともに低下し、パルス数が大となること、正負コロナについて比較すると $\tau_{s+}/\tau_{s-} > 1$ で、乾燥するに従つてその比が大となることが判明した。しかし、

☆ 50~500 % を印加する集中法では、試料が小さいか、あるいは湿度が特に大とならない限り、サイクル当りのコロナパルス数は漏洩抵抗によつて変化しないことが明らかになつた。

コロナ放電による絶縁材料の劣化機構において、劣化エネルギーは電子、イオンの荷電粒子あるいは励起分子等によつて試料に与えられている。

本研究において、電子それ自体が試料表面に衝突した際の劣化効果を研究する目的で、ポリエチレンフィルムに電子を照射した。電子源には熱電子を利用し、 $1 \times 10^{-3} \text{ mmHg}$ の空気および窒素中において300Vないし1,500Vの直流電圧によつて、電子をポリエチレンフィルムに向けて加速した。

一般に誘電体に低エネルギー電子を照射すると、誘電体の表面に空間電荷が形成され、後続する電子に対して逆電界を形成するため、正味の衝突エネルギーが不明となる。

本実験では電子線の電磁偏向を用い照射エネルギーを確認した。

照射電圧1,000Vの場合照射によつて流れる体積電流および表面電流は夫々 $10^{-9} \sim 10^{-10} \text{ A}$ および $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ A}$ であり、大部分は表面電流となる。

照射ポリエチレンの表面が着色し、変質していると見られるため、電氣的には表面電気伝導度の変化が期待される。試料ポリエチレンは、未照射の場合 $10^{20} \Omega$ 程度の表面抵抗率を持つている。しかし、このような高抵抗の測定値は一般に再現性を欠き、桁数程度の信頼度にとどまる。それゆゑ、本研究では抵抗値それ自体の変化よりも、表面伝導における活性化エネルギー ϵ の変化に着目し、表面抵抗の温度特性を重視することにした。有機高分子材料のもれ電流はイオン性であるとされており、もれ電流 I_s は、電子放射の式を用いて $I_s = I_0 \exp \left(-\frac{\epsilon}{KT} \right)$ で示すことができる。 I_0 はもれ電流の飽和値、 K はボルツマン定数である。

電子照射をおこなったポリエチレンの表面電気伝導度の温度特性を測定した結果、未照射試料とくらべ、活性化エネルギーが0.04～0.2eV低下した。しかし、この変化はコロナ劣化を行なわしめる際、放電現象を変化させる程の効果を持たない。

また、電子照射による劣化表面を電子顕微鏡によつて観察したが、コロナ劣化表面と様相を異にする。

照射フィルムの赤外線吸収スペクトルによれば、表面層の酸化が認められ、微量の酸素の存在によつても酸化の生ずることが明らかになった。照射試料のコロナ劣化試験を集中法を用いて行つた結果、未照射試料より耐コロナ性が大であった。

従つて、

☆ $1 \times 10^{-3} \text{ mmHg}$ の空气中で102eV程度の電子を照射したが、電子照射自体は放電劣化の本質ではない。また

☆ 電子照射によつて生ずるフィルム表面の変質層は残留気体の影響をうける。またその層はコロナ放電からフィルムを保護する働きをもつことが明らかになった。

ポリエチレンに対する熱電子照射について、イオンが絶縁材料に照射された時に生ずる絶縁劣化現象に関する研究を行った。

照射用イオン源には、約 3×10^{-2} mm Hg 空気中における無電極高周波放電によつて生じたプラズマを使用し、空気中におけるコロナ劣化試験の際のコロナパルスを想定して、プラズマ中のイオンを、パルス巾 $1 \mu\text{sec}$ 、くりかえし周波数 1 Kc のパルス電圧によつて試料に向け加速し照射した。

ポリエチレンの熱電子線照射では、照射による系統的な重量変化を認めることはできなかったのに対して、イオン照射では明らかに照射に比例した重量減少が認められ、ポリエチレンの放電電荷量当りの減量は、平行平板形コロナ試験で生ずる重量減少の割合と同程度であつた。

コロナ放電に対して弱いと云われるテフロンは、イオン照射においても特に減量が大であつた。

このようにイオン照射によつて直接劣化された試料の、交流短時間破壊電圧を測定した結果、重量減少から期待される以上に破壊電圧が低下するという結果が得られた。電子顕微鏡写真を用いて直接衝撃を受けた試料面の高低差を求めたところ、凹凸の激しい幾何学的変形が認められた。絶縁材料の破壊における treeing 効果を考える時、このような深い、あるいは穿孔的 surface 侵食は破壊をもたらしやすい。従つて、

- ☆ イオン衝撃は、比較的均一な侵食劣化作用をもつばかりでなく、直接破壊をもたらす侵食劣化効果に対しても、大なる効果をもつものであることが明らかになつた。

論文審査の要旨

電気絶縁材料におけるコロナ放電劣化の問題は、機器の小型化、使用電圧の高圧化に伴い電気工学の基礎的な重要研究課題の1つになるに至った。電気機器が不平等電界中で長年月にわたって使用されると、耐圧の優れた絶縁材料もコロナ放電によつて徐々に劣化する場合が多く、これに制約されて実用上絶縁材料はその真性電気強度 (Intrinsic Electric Strength) の十分の一以下の電界で使用されているのが現状である。わが国においてもこの問題について近年多くの研究が進められているが、現象が複雑なためまだ十分に解明されるには至っていない。

著者は、本研究を進めるにあつてコロナ劣化特性測定法の検討から着手し、特にコロナ劣化の極性効果究明を中心として詳細な基礎的実験研究を行なつて来た。本論文はこれを取りまとめたもので、全編8章よりなる。

第1章は緒論であり、第2章は本研究の試料：ポリエチレン、マイラ、テフロンについて一般的性質を述べたものである。

第3章では、従来用いられている各種のコロナ劣化試験法の比較検討を行ない、集中法による測定が優れた再現性をもつことを明らかにしている。

第4章は、交流コロナ劣化試験について述べたもので、500%の交流電圧印加時における劣化破壊に至るまでの寿命と、電圧・周囲温度・放射線照射等との関係を求めている。その結果コロナパルス電流が印加電圧とともに大きくなる現象を見出し、それをWhiteheadの理論を拡張して説明することに成功している。温度特性についてはポリチレンの空気中における耐コロナ性と窒素中、六弗化硫黄中の場合との比較から、劣化現象にオゾンが重要な役割を果すことを推論し、さらに γ 線及び β 線照射ポリエチレンの劣化温度特性が未照射のものと変わらないことからその推論を裏付けている。

第5章は、パルス電圧によるコロナ劣化について述べたもので、1つの電圧パルスに対して1回のコロナ放電を行なわせる方法によつて極性効果を測定し、正コロナによる劣化が負極性による劣化より大であることを明らかにしている。

第6章は、気体絶縁材料としての電氣的負性気体中におけるコロナ劣化について述べたもので、六弗化硫黄中ではコロナ放電が比較的開始しにくく、かつ劣化は遅いが、単位放電電荷量に対しては空気中よりむしろ劣化が早いことを見出している。

第7章は、ポリエチレンに熱電子照射を行なつた場合の劣化特性について述べたもので、コロナ劣化特性は本質的には電子照射により変化しないことを確認している。

第8章は、イオン照射について述べたもので、この場合はコロナ放電劣化と同様な重量減少が認められ、電子顕微鏡による観察の結果、侵食小孔の生成する現象を指摘している。本章は著者のもつとも重点を置いたところであり、従来不分明であつたコロナ劣化機構を基礎的に追求して第5章の結論を検証した点は重要な貢献である。

以上を要するに本論文は、コロナ放電による絶縁材料の劣化現象を加速試験によつて実験的に研究し、電子よりむしろ分子状の正負イオンが重要な役割を演じることを中心として、一連の興味ある現象を見出しこれを論じたもので、コロナ放電劣化現象に関し多くの重要な知見を加え、電気工学特に高電圧工学に寄与するところが少なくない。

よつて、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。